

地山強度の時間依存性を考慮した変状予測と 補強工法の効果に関する研究

蒋 宇静*・藤崎雅史*・川田晶仁**・棚橋由彦*

Deformation Prediction and Effect of Reinforcement Method by Considering Time Dependency of Rock Strength

by

Yujing JIANG*, Masafumi FUJISAKI*, Akihito KAWATA** and Yoshihiko TANABASHI*

Soft rock has the characteristic of time dependency, that is to say, creep and/or deterioration of strength. Ground-pressure toward tunnel lining due to the deterioration of compressive strength of surrounding rocks is expressed by using a finite difference method, which can express forcefully the plastic flow and large-strain deformation behaviour. Based on excavation simulations of tunnel by considering the time dependency of rock strength, judgment of the rational maintenance period and management method are discussed. Furthermore, the effect of proposed reinforcement methods on controlling development of deformation and plastic zones are also examined.

Key Words : time dependency, deformation prediction, reinforcement method, tunnel

1. はじめに

軟岩の力学的な特徴としては、ひずみ軟化やダイレーションのみならず、クリープや強度低下の時間依存性が挙げられる。日本国土は広く軟岩で覆われており、道路トンネルや鉄道トンネルの大半がこのような軟岩の地山中に施工されている。これらのトンネルにおいて二次覆工が施工された後、時間の経過とともに周辺地山に塑性領域が拡大してトンネル内空側に地山が押し出されて、地圧が覆工に作用するケースが見られる。この地圧は塑性圧と呼ばれ¹⁾、覆工に対して変形、ひび割れ、剥落などのダメージを与えることがある。この塑性圧は、トンネル掘削によって周辺地山に塑性領域が形成された後その塑性領域が拡大するものであり、塑性領域における地山の力学特性が変化するなどの時間依存性に起因すると考えられる。また、覆工にダメージを及ぼすもう 1 つの要因としては、覆工自体の経年劣化が挙げられる。このような状況においては、内空変位の進行を抑制したり、必要な内空断面（建築限界等）を確保するなどのトンネル変状に対する補

強対策が必要になる。このため、設計段階より変状発生の程度やこれによる補修の必要性、その部位、最適な対策工の選定、またはその効果を精度よく予測することが求められる。また、補強工を施工した場合は、内空変位計測などでその後の変位の経時変化を実測することにより補強効果を評価することが望まれる。

さて、上述の予測や評価には変状現象の発生メカニズムが的確に反映された事前の力学的検討が有効であると思われる。これには地山および覆工の適切な力学モデルを用意し、かつ、その力学モデルに基づく力学的挙動を良好に再現できる数値解析手法の適用が必要である。しかしながら今までは、設計当初より地質情報が不足している事情もあり、これまでは変状に対する事前評価がなされることは少なかった。本研究は、予防保全の観点から、トンネル変状の要因として塑性圧に着目して地山強度の経時的劣化と覆工劣化を考慮したトンネルの変状解析を行い、得られた内空変位の経時的変化に基づいて補強工実施に関する各種の判断を支援するシステムの開発

平成 17 年 6 月 24 日受理

* 社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

** 生産科学研究科博士前期課程 (Graduate Student, Graduate School of Science and Technology)

を目指すものである。各所の要素技術は未完成ながらも、将来的には合理的な維持管理時期を判断できる手法の確立が期待できると考える。

2. 強度低下の時間依存性モデル

トンネル掘削が巨視的には低い速度で滑らかに行なわれることを考慮すれば、掘削後の時間依存性の変形に最も大きな影響を及ぼしているのは、クリープ、あるいはクリープ破壊であると考えられる。クリープ破壊とは、一定荷重下で変形が進行し、ある時間の後に破壊が生じる現象である。この現象は、別の観点から時間と共に岩石の強度が低下してゆく過程と見なすこともできる。適当な応力下では、岩石の構造骨格（特にクラック端）が水分等の影響により劣化し（応力腐食）破壊に至るのである。トンネルでみられる大きな変形は、このような原因で破壊が徐々に進行してゆくために生じると考えられる。そこで、里・亀村らの研究²⁾では、岩石強度の時間依存性を次式により表わしている。

$$\frac{dC}{dt} = -\lambda R \quad (R \leq 1.0) \quad (1)$$

$$R = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2C \cos \phi + \sin \phi (\sigma_1 + \sigma_3)}$$

ここに、 λ は強度劣化の速度を表わす定数である。パラメータ R は応力状態の破壊条件に対する接近度を表わしており、上式は応力が破壊条件に近づくにつれ、強度劣化の速度が大きくなることを意味している。ただし、強度定数の粘着力項についてのみ時間依存性があると仮定している。破壊（ $R = 1$ ）の挙動のモデル化は、ここでは強度の時間依存による効果のみに注目するため、最も単純な形として一定速度で強度が低下することとした。 λ は岩石に含まれる空隙やク

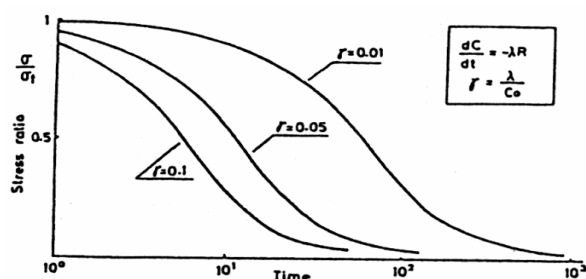


図-1 応力比と破壊時間

ラックの量、あるいは環境の腐食性の強さに依存すると考えられる。含水量を制御した圧縮試験では、含水量の増加と共に強度が低下することが知られており、この推測の根拠となっている。図-1は、式(1)を用いて一軸定荷重試験におけ

る破断時間をプロットしたものである。岩石試験によれば、応力が圧縮強度より低くなるにつれ、破壊に要する時間が指数関数的に増加することが知られており、式(1)ではある程度この傾向が表現されている。

3. 補強工の選定

変状トンネルの補強対策では、覆工の内空変位の進行を抑制し、必要な内空断面（建築限界等）を確保することが最も重要な条件となる。また、一般に補強工の施工後は、内空変位計測などでの変位の経時変化を実測することにより補強効果が確認される。そのため、補強工の設計においては、変位の抑制効果を評価することが望ましい。この内空変位は、主に地山の緩みと覆工の劣化が原因で発生しており、ひび割れや剥離等を引き起こす。

本論文では、多様な対策工の中で、補強効果、施工性、経済性等の観点から、内巻工、内面補強工（炭素繊維シート接着工法、鋼板接着工法）、裏込め注入工を変状対策工として考えた。

(1) 内巻工

内巻工は、トンネルの変状対策として多くの実績があり、その目的は地圧対策の他、覆工材料の劣化対策、漏水・凍害対策をして採用される場合も多い。

内巻補強の工種には吹付けコンクリート工法がある。従来は薄い吹付けが多用されてきたが、覆工との付着性や部材としての一体性に対する配慮が不十分であったため、吹き付け材料の劣化が甚だしく、剥離による事故もしばしば発生している。最近では曲げに対する補強や一体化による剥落防止も兼ねて金網を入れ、高分子材料を添加した材料を使用することで吹き付け厚さを10mm程度まで低減させているが、施工実績が10年程度で、耐久性の問題などからあまり用いられていない。

このようなことから、現在は鋼繊維補強コンクリートを用いたものが主流であり、ここではそれについて述べる。

① 鋼繊維補強コンクリートの特性

鋼繊維の混入率が1.5%以下のものの引張強度は、鋼繊維の入っていないプレーンコンクリートとほぼ同等である。従って、鋼繊維補強コンクリート部材にひび割れが発生する時の断面力としては、プレーンコンクリートと比較してもさほど大きくならない。しかし鋼繊維補強コンクリート部材では、鋼繊維がひび割れ間の引張力を伝達するので、ひび割れが発生した後も荷重を保持することができる。

② 材料

鋼繊維補強コンクリートの設計基準強度は、施工実績とコンクリートへの定着を考慮して、30~36N/mm²を標準とする。鋼繊維の混入率が1.5%以上となるとポンプ圧送の施工性が

低下するため、混入率1% (体積比) 以下を標準とする。

③留意点

覆工には構造上大きな軸力が発生する。内巻工に生じる軸力を支える、あるいはインバートがある場合に断面力をインバートに伝える等の目的で、内巻工の脚部には足つけを設けなければならない。

(2) 炭素繊維シート接着工法

炭素繊維シート工は、非常に厚みの薄い繊維シートを接着する工法であるので、覆工劣化対策のうち、最も内空断面の減少が少ない工法である。

①特性

重機等が不要な簡単な工程であり、少人数かつ短工期で済む。軽量で可搬性に優れ、搬入・施工が容易である、という利点がある。曲げひび割れの開口を抑制する効果が高く、繊維の持つ強度特性が最大限に発揮され、高い補強効果がえられる。また樹脂と繊維だけを用いるため、錆の発生がない。ただし、圧縮力を受ける箇所では補強効果が期待できない、可燃性である、劣化が著しく、コンクリート強度が小さい場合には補強効果が期待できない、等の留意点がある。

②積層数

積層数は、原則としてトンネル周方向、軸方向それぞれ1層をとし、互いに直行する方向に重ね合わせる。繊維方向には施工継手を設けるものとし、応力伝達に必要な重ねしろとして最低10cm以上を確保する。継手部分の重ね合わせ長さが5cm以上であれば、継手強度はほぼシートの引張強度に達することが確認されている。

(3) 鋼板接着工法

鋼板接着工法は、覆工表面に鋼板を接着する工法である。鋼板は覆工との間に数mmの樹脂厚を確保する必要がある。取り付けについては、アンカーボルトで固定する必要がある。そのため炭素繊維シート補強工法に比べると内空断面が損なわれるが、他の補強工法と比較して、内空断面の減少が十分少ない工法である。

①特性

剥落防止に効果があるほか、覆工の内面に鋼板を接着することにより、内面に生じる引張応力を受け持たせ、特に曲げひび割れの開口を抑制する効果が期待できる。このように、被覆効果により内空側からの覆工の劣化を抑制できるが、鋼板は炭素繊維シートに比べて重量が大きく施工性が劣る、コンクリート強度が小さい場合には補強効果が期待できない、鋼板の防食のため、定期的に塗装する必要がある、導電性を有する、等の留意点がある。

②材料

内面補強に用いる鋼材は高強度を必要としないので、SS400

を標準とする。また鋼板の接着に用いる接着樹脂は、原則としてエポキシ樹脂を用いることとし、使用環境を十分に考慮した上で適切な材料を用いる。

(4) 裏込め注入工

トンネル覆工は、覆工コンクリートと地山を密着させ、均等な荷重が働くようにするとともに、地盤反力を十分期待できるものとするのが重要である。しかしながら、NATM工法が取り入れられる以前に建設された矢板工法によるトンネルにおいては、鋼製支保工や矢板などのため覆工背面と地山との間に空隙が残ることが多く、とくにアーチ天端部では相当の空隙が生じる場合がある。この空隙により、覆工に局部的に不均等な荷重が作用し、十分な地盤反力が期待できないため、変状対策の基本として裏込め注入を実施する必要がある。なお、比較的新しいトンネルでは矢板工法に代わりNATMにより施工されており、この場合、吹付けコンクリートを用いることで、地山とコンクリートの密着性が確保され、空隙の少ない状態となっており、矢板工法に比べて裏込め注入を必要とする空隙は少ないものと考えられる。しかし、NATM導入初期には矢板を多用していたトンネルもあり、覆工コンクリートの打設方法によっては、吹付けコンクリートと二次覆工との間に空隙を生じることもある。

①背面空洞の分布・大きさ

裏込め注入工の対象となる空隙の状態は、正確に把握することが困難な場合が多いが、一般には事前に適当な間隔でボーリング調査孔を設けて、範囲および大きさを調査するのがよい。最近では、電磁波（地中レーダ）や超音波などにより非破壊で調査する手法が実用化されつつあり、調査範囲が広い場合などには有効であると考えられる。

②注入材の種類と特徴

注入材は、覆工に作用する地圧を均等に伝達する役割を果たすものである。従って、地盤と覆工とが注入材によって密着できるよう細部まで充填できて、それぞれの変位、変形による反力を十分に伝達できる材料を選定する必要がある。注入材は、空隙の大きさや湧水状況等に応じて適切なものを選定する必要があるが、一般にはセメントを主材としたものが多く用いられている。

4. 時間依存性を考慮したトンネル変状解析

(1) 変状シミュレーション手順

本章では、地山強度の経時変化と覆工劣化を考慮したトンネル変状シミュレーションを行う。ここで用いたモデルは、一般的な軟岩に施工された土被り100mの道路トンネルを想定している。掘削は一括掘削とし、無支保で30%応力解放し

た後に吹付けコンクリートおよび鋼製支保工を施した．そしてこの状態のまま 95%まで応力解放した後に，二次覆工およびインパートコンクリートを施し，残り 100%まで応力解放した．解析モデルを図-2 に示す．地山は，日本道路公団の D I クラス程度の軟岩を想定して，Mohr-Coulomb 降伏条件式に基づく弾完全塑性体としてモデル化した．地山の強度低下は，トンネル供用直後から発生すると考えて，前章で述べた里らの式 (1) 基づいてこれを前進差分で近似した式 (2) を適用し，実時間による解析を行った．

$$\frac{dc}{dt} = \frac{c^{t+1} - c^t}{\Delta t} \quad \therefore c^{t+1} = c^t - \lambda R \Delta t \quad (2)$$

ここで，強度低下速度を表す λ は，0.0333 (MPa/year) と仮定した．支保および覆工の物性値は，日本道路公団の示方書を参考にした．解析法は，塑性領域が持続的に発生・拡大して大変形挙動・崩壊に至る過程を安定的にシミュレートできる数値解析法の 1 つである Cundall らの有限差分法^{3),4)}を適用した．時間積分は式 (2) の経過時間中の各時刻 t において力学的平衡を満足するよう時間きざみ幅 Δt を調整しながら進めた．これにより Mohr-Coulomb 降伏関数に時間依存性を持たせた解析・モデル化が実現できたと考える．

解析は，まず地山の強度劣化を想定し，(1) 無支保，(2) 覆工弾性体，(3) 覆工劣化とした場合の内空変位量の差を把握する．本研究では，ひび割れや剥落を引き起こす覆工のモデル化を，有限の大きさを持つ要素に分割する方法を採用し，分布ひび割れを考慮して便宜上コンクリートの剛性を 1/70 に低下させることで劣化を表現した．以上を踏まえた上で，補強工の施工時期の相違 (10 年後，20 年後，30 年後) による経時的な変位量の差を比較する．なお，全解析ケースにおいて変位は掘削開始時からの累計とする．地山，支保および覆工，各補強工の物性値は表-1 のとおりである．時的な変位量の差を比較する．なお，全解析ケースにおいて変位は掘削開始

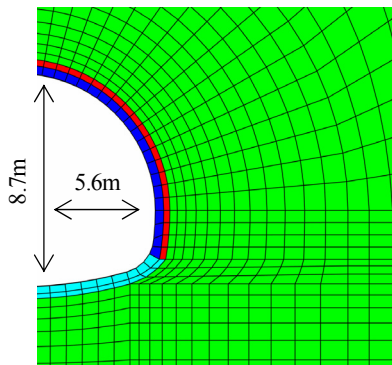


図-2 解析モデル (掘削時)

表-1 地山と支保の物性値

	弾性係数 (MPa)
地山	500.0
支保および覆工	
吹付けコンクリート	4000
鋼アーチ支保工	2.3×10^5
二次覆工・インパート	2.35×10^4
補強工	
内巻工	3.1×10^4
炭素繊維シート工	2.3×10^5
鋼板接着工	2.1×10^5
裏込め注入工	5.0×10^3

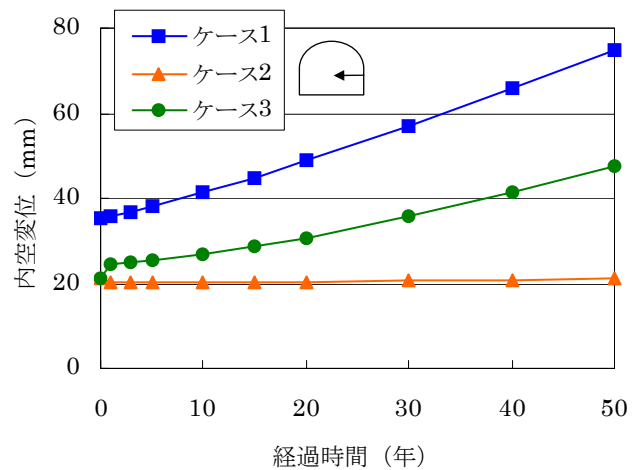


図-3 覆工の劣化を考えた内空変位の比較

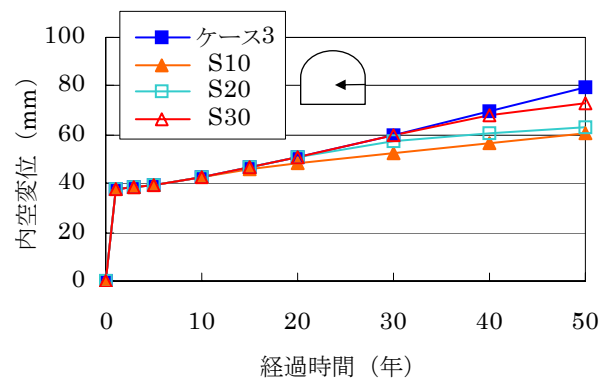


図-4 内巻工を用いた内空変位の比較

時からの累計とする．地山，支保および覆工，各補強工の物性値は表-1 のとおりである．

(2) 変状解析の結果と考察

表-2 解析ケース

支保	背面空洞	補強工		施工時期	ケース	
無支保	無し	無し			1	
覆工弾性体					2	
3						
覆工劣化		内巻工	炭素繊維	供用後 10 年	S10	C10
				供用後 20 年	S20	C20
				供用後 30 年	S30	C30
	60°	無し			4	
裏込注 入		内巻工	供用後 10 年	M10	S'10	
	供用後 20 年		M20	S'20		
	供用後 30 年		M30	S'30		

a) 補強工のない場合

表-2 に解析ケースを示す。まず、無支保の場合（ケース 1）、覆工劣化を考慮しない場合（ケース 2）、覆工が劣化する場合（ケース 3）の内空変位の経時変化を示したものが図-3 である。覆工の劣化は、分布ひび割れを考慮して便宜上コンクリートの剛性を低下させることで表現した。図-3 より、ケース 1 の無支保では 50 年経過すると約 40mm の内空変位の増加がみられるが、覆工を弾性体としたケース 2 では変位がほとんど生じていない。一方、覆工も劣化すると仮定したケース 3 では、約 26mm の増加が生じている。覆工によりある程度の抑制効果がみられるものの、やはり時間の経過とともに変位の増加がみられる。現在実務で行われている解析では、多くが覆工を弾性体として、地山のみが劣化を示すと仮定しており、時間が経過しても変位増加がほとんど生じないという解析結果となる。実現場において供用後の内空変位発生は数多く報告されており、これらのことから、地山および覆工の劣化を併せて考慮した解析を行う必要があることがわかる。

b) 補強対策を実施した場合

補強工の施工時期の相違による補強効果の把握を目的として、施工時期が異なる場合の覆工表面の内空変位と天端変位の相違を比較する。ここでは、地山・覆工ともに劣化する解析ケース 3 または 4 に対して、供用後 10 年、20 年、30 年で補強を行った場合を検証している。工法は弾性体としてモデル化した内巻工および炭素繊維シート工と、背面空洞に対し Mohr-Coulomb のモデル化をした裏込め注入工（エアモルタル）を施しており、内巻工と炭素繊維シート工に関しては、便宜上劣化は考慮しなかった。

図-4、5 にそれぞれ内巻工と炭素繊維シート工の補強時期の相違による内空変位の比較を示す。内巻工の場合、ケース 3 の変位が約 80mm であるのに比べて、10 年後に施工した S10

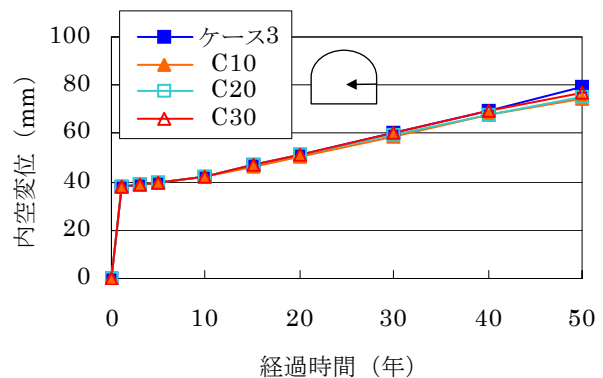


図-5 炭素繊維シート工を用いた内空変位の比較

は約 60mm と、20mm 程度の変位の抑制効果があることがわかる。また、早期に補強すれば内空変位は小さく、補強が遅くなるほど変位が大きくなるという傾向が見られる。炭素繊維シート工の場合も同様の傾向を示しているが、10 年後に施工した C10 でも 5mm 程度の抑制と、内巻工ほどの効果は現れていない。変位抑制の面のみで考えれば、内巻工を 10 年後に施工することが効果的であると考えられる。

図-6 に深さ 5cm、範囲 60° の背面空洞を想定したトンネルにおける裏込め注入工施工時期の相違による天端変位の比較を示す。10 年後に施工した M10 は、変位が約 25mm にまで抑制されているが、20 年後以降に施工した場合はその効果はほとんどなくなっていることがわかる。この結果から、裏込め注入工は、10 年後もしくはできるだけ早い時期に施工を行うとより効果が高いと考えられる。また、図-7 は裏込め注入工の代替工法として、内巻工を施工した場合の天端変位の比較である。図-4 と同様の傾向を示していることから、覆工背面空隙がある場合にも内巻工は有効であり、さらに裏込め注入工との併用をすることで顕著な補強効果が期待できると考える。

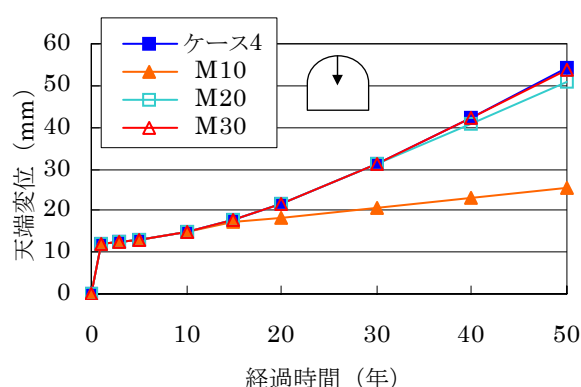


図-6 裏込め注工を用いた天端変位の比較

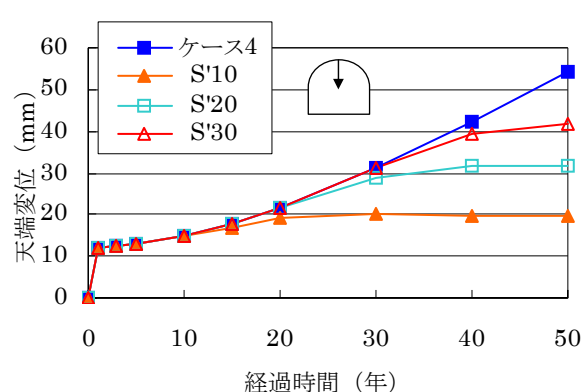


図-7 内巻工を用いた天端変位（空洞あり）

5. 今後の課題

本研究では、トンネル変状の要因として塑性圧に着目して地山強度の経時的劣化と覆工劣化を考慮したトンネルの変状解析手法を提案し、得られた内空変位の経時的変化に基づいて変状対策工（内巻工、炭素繊維シート工と裏込め注工）の効果を比較した。しかし、変状対策工には、本研究で挙げたもの以外にもロックボルト補強工などがあるため、それらとの比較を行い、また施工費や維持管理費などの算出を行うことで、有効な補強工法の検討ができるものとする。本解析では、示方書を参考にして得られた物性値等を用いて解析を行ったが、実計測のデータを得ることができれば、実状により則した解析が行えるものとする。今後は、実ケースをフィードバックさせることで変状予測手法の適用性を高めていく。

参考文献

- 1) (社) 土木学会：トンネルの変状メカニズム，2003
- 2) 里 優，竹田直樹，亀村勝美：強度の時間依存性に着目した岩盤の解析，第18回土質工学研究発表会論文概要集，pp. 817-820，1983
- 3) Cundall, P. A. and Board M.: A microcomputer program for modeling large-strain plasticity problems, Proc. of 6th Int Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Innsbruck, Austria, pp. 2101-2108, 1988
- 4) 中川光雄，蔣 宇静，江崎哲郎：大変形理論の岩盤挙動および安定性評価への適用，土木学会論文集，No. 575/III-40，pp. 93-104，1997